

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-97-374

На правах рукописи
УДК 539.164 + 539.143.2

A - 655

АНДРЕЕВ
Андрей Николаевич

СИНТЕЗ НОВЫХ ИЗОТОПОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК АЛЬФА-РАСПАДА
НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫХ ИЗОТОПОВ
В ОБЛАСТИ УРАНА-ПЛУТОНИЯ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1997

Общая характеристика работы

Работа выполнена в Лаборатории Ядерных Реакций им. Г.Н. Флёрва
Объединённого Института Ядерных Исследований, г. Дубна

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Д.Д. Богданов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

К.Я. Громов

доктор физико-математических наук
профессор

А.М. Демидов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г.Москва

Защита диссертации состоится "29" января 1998 года
в "12" час на заседании специализированного совета Д047.01.03 при
Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ (г.Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "22" декабря 1997 года.

Учёный секретарь специализированного совета
профессор

Ю.А. Батусов

Актуальность темы

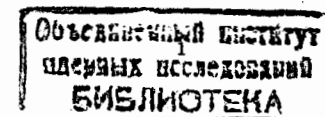
В 1996 году исполнилось 100 лет с момента открытия Анри Беккерелем явления альфа-распада ядра, что явилось первым наблюдением процесса радиоактивного превращения в ядрах. Однако, несмотря на длительный период изучения этого явления, исследование характеристик альфа-распада традиционно остаётся одним из основных методов изучения структуры ядра (см. обзоры [1,2] и ссылки в них).

Основными чертами процесса альфа-распада, предопределившими постоянный интерес к изучению этого явления, являются, с одной стороны, относительная простота его экспериментального измерения и, с другой стороны, удивительное многообразие информации, получаемой на основе анализа полученных экспериментальных данных. Действительно, исходя из измеренных данных, можно получить практически все основные характеристики изучаемых ядер, а именно:

- энергию распада основного состояния и дефект массы изучаемого ядра, если известен дефект массы дочернего ядра;
- энергии изомерных и возбуждённых уровней ядра;
- спины и информацию о структуре и порядке заполнения уровней материнского и дочернего ядер (например, методом α - γ совпадений и по изучению факторов запрета изучаемых переходов).

Основной темой диссертации является экспериментальное исследование характеристик альфа-распада нейтронодефицитных нуклидов в сравнительно малозученном регионе ядер урана-плутония. Область ядер с $90 \leq Z \leq 94$ и $126 \leq N \leq 136$ является очень интересной для изучения благодаря многообразию явлений которые либо уже были наблюдаемы, либо предсказываются теорией для этого региона ядер.

В частности, в этой области происходит переход от деформированных ядер ($N=136$) к сферическим ($N=126$), что хорошо демонстрируется тем фактом, что



энергия $E(2^+)$ первых возбуждённых 2^+ уровней возрастает от $E(2^+) \approx 60$ кэВ для чётно-чётных ядер с $N \approx 136$ до $E(2^+) \approx 1300$ кэВ для ядер с $N \approx 126$.

Другим фактором, определяющим важность изучения этого региона, является предсказываемая область октупольной деформации [3,4] и появление зеркально-асимметричных форм для ядер с $A \approx 224$. В частности, предсказывается, что ядро ^{224}U имеет наибольшую величину октупольной деформации и её учёт приводит к дополнительному понижению минимума полной потенциальной энергии для этого ядра приблизительно на 0.5 МэВ.

Кроме того, недавно выполненные расчёты [5] по модели, учитывающей влияние октупольной деформации, также подтверждают существование области зеркально-асимметричных ядер с $A \approx 225$ и эта модель систематически улучшает согласие между экспериментальными и расчётными значениями в этом районе масс. Подчёркнём, что впервые явления, характерные для октупольно-деформированных ядер, были обнаружены именно в экспериментах по изучению альфа-распада тяжёлых ядер [4].

Целью данной работы являлось проведение экспериментов по изучению характеристик альфа-распада нейтронодефицитных нуклидов в области $Z=90-94$; разработка алгоритмов идентификации нуклидов методами "Ядро-отдачи - α " и α - α корреляций; создание программного обеспечения для ON-LINE и OFF-LINE обработки экспериментальной информации, получаемой в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА; сравнение полученных данных с существующими массовыми формулами и теоретическими расчётами масс; построение систематик для энергий и периодов полураспада; извлечение структурных эффектов в строении изучаемых ядер.

Научная новизна

В реакциях полного слияния $^{20,22}\text{Ne}, ^{24,26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb}$, $^{20,22}\text{Ne} + ^{209}\text{Bi}$ и $^{27}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$ синтезировано 12 новых нуклидов $^{218,219,223-226}\text{U}$, $^{225-227}\text{Np}$, $^{228-230}\text{Pu}$. Для ряда уже известных нуклидов получены уточнённые данные о характеристиках их альфа-распада.

На основе полученных экспериментальных данных вычислены значения дефектов масс новых нуклидов и уточнены значения дефектов масс для ряда известных нуклидов. Показано, что расчёты Мёллера и со-авторов [5], Лирана-Зельдеса [6] и Джэнеке-Мэссона [7] дают достаточно хорошее согласие для изучаемых ядер с числом нейтронов $N > 126$. При этом новая модель Мёллера и со-авторов с учётом октупольной деформации даёт лучшее согласие с экспериментальными данными, чем это было в их предыдущей модели, которая не учитывала этот эффект.

Из сравнения приведённых ширин альфа-распада для чётно-чётных ядер в изучаемой области сделан вывод о том, что небольшая разность деформаций материнских и дочерних ядер (например, $\epsilon_2 \approx 0.2$ для материнских ядер $^{224,226}\text{U}$ и $\epsilon_2 \approx 0$ для соответствующих дочерних ядер $^{212,214}\text{Rn}$), свойственная изученным ядрам, не оказывает заметного влияния на вероятность альфа-распада.

На основе величин факторов запрета проанализированы данные о вероятностях альфа-распада изотопов урана с нечётным массовым числом в широкой области изменения массового числа $219 \leq A \leq 233$. Показано, что альфа-распад всех рассмотренных нуклидов является разрешённым и наличие дополнительного неспаренного нейтрона не оказывает существенного влияния на вероятность альфа-распада этих изотопов, что, вероятно, является следствием того, что волновые функции материнских (ядра урана) и дочерних ядер (ядра тория) имеют сходные структуры.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объём диссертации - 112 страниц машинописного текста, включая 20 рисунков, 8 таблиц и библиографический список из 88 наименований.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на XXXVIII Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Баку, 12-14 апреля 1988 года; на международной конференции "Actinides-89", Ташкент, 24-29 сентября 1989 года; на

международной конференции "6th International Conference on Nuclei far from Stability + 9th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernkastel-Keus, July 19-24, 1992; на международных школах-семинарах по физике тяжёлых ионов, Дубна, октябрь 1989 года и май 1993 года,

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах.

Содержание работы

В *Главе 1* кратко представлена теория альфа-распада; а также приведены некоторые основные формулы, на основе которых проводился анализ экспериментальных данных, полученных в настоящей работе. Кроме этого, в первой главе дан обзор литературы по альфа-распаду тяжёлых ядер и приведено несколько современных примеров использования альфа-распада для изучения структуры ядра.

В *Главе 2* описаны экспериментальная методика, электростатический сепаратор ВАСИЛИСА [8] и детектирующая система [9], использованные в данной работе. Кинематический сепаратор ВАСИЛИСА (Рис.1) представляет собой трехступенчатый электростатический сепаратор, главной частью которого является система из трех дефлекторов, осуществляющая эффективное разделение продуктов реакций полного слияния от продуктов реакций передач и пучка бомбардирующих ионов благодаря разнице в их энергетических и зарядовых распределениях.

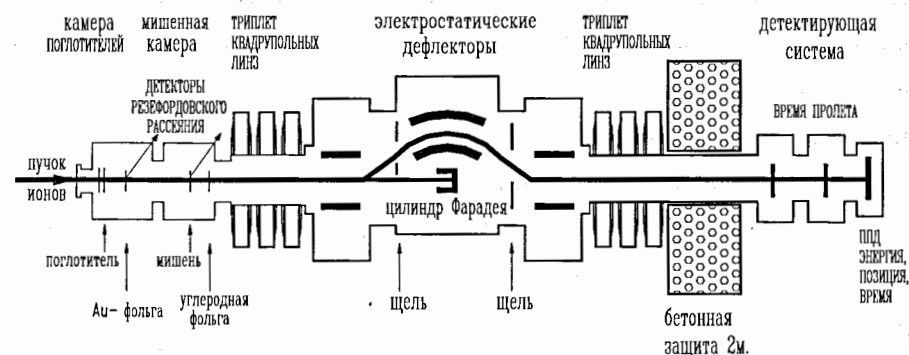


Рис. 1 Схема электростатического сепаратора ВАСИЛИСА.

Первый триплет электромагнитных квадрупольных линз, установленный перед системой дефлекторов непосредственно после мишени, фокусирует ядра отдачи

(ЯО), вылетающие из мишени. ЯО отклоняются в первом дефлекторе на угол 8° и попадают в апертуру второго дефлектора, тогда как ионы первичного пучка, имеющие большую энергию, проходят через первый дефлектор практически не отклонившись и останавливаются в цилиндре Фарадея, находящемся между первым и вторым дефлекторами. Второй триплет электромагнитных линз, установленный непосредственно после третьего дефлектора, служит для фокусировки ЯО в детектирующее устройство, расположенное в фокальной плоскости сепаратора. Детектирующее устройство состоит из двух времяпролётных детекторов для регистрации времени пролёта ядер отдачи и позиционно-чувствительного полупроводникового детектора, куда имплантируются ядра отдачи и где регистрируются их энергии, позиции и времена и соответствующие характеристики для их последующих альфа-распадов. Основные характеристики сепаратора приведены в Таблице 1.

Идентификация большинства известных нуклидов, альфа линии которых могли быть хорошо выделены из фона, обычно проводилась по их энергиям и периодам полураспада и/или по их функциям возбуждения. В случае новых изотопов и/или в случае изотопов с очень низкой статистикой обычно применялся метод "Ядро отдачи -альфа" и "альфа-альфа" корреляций [10]. Основная идея метода состоит в том, что для любого имплантированного в детектор ядра отдачи

Таблица 1. Основные параметры установки ВАСИЛИСА

Максимальная интенсивность пучка на мишени	1×10^{13} ионов/с
Диаметр мишени	10 мм
Толщина мишени	$100 + 500$ мкг/см ²
Телесный угол захвата	15 мср
Полоса пропускания по энергии	15%
Эффективность	$3 \pm 30\%$
Фактор очистки от частиц пучка	$10^{15} + 10^{16}$
Апертура квадрупольных линз (радиус)	100 мм
Максимальное градиент магнитного поля в линзах	10 Т/м
Расстояние между пластинами дефлекторов	150 мм
Максимальная напряжённость электрического поля в дефлекторах	20 кВ/см
Расстояние от мишени до детекторов	12 м

его последующие (коррелированные во времени) альфа-распады, ведущие к известным ядрам, должны быть наблюдаемы в точке имплантации, в пределах позиционного разрешения детектора. Применение позиционного и временного окон для поиска коррелированных событий существенно снижает вероятность случайных совпадений, позволяя проводить однозначную идентификацию нуклидов. Период полураспада материнского ядра определяется методом "ЯО-альфа распад" корреляций по измерению временных интервалов между имплантацией ЯО и его первым α -распадом в данной точке (в пределах позиционного разрешения детектора). Периоды полураспада дочерних ядер определяются методом "альфа-альфа" корреляций по измерению временных интервалов между последующими α -распадами.

Глава 3 посвящена созданию программного обеспечения для ON-LINE и OFF-LINE обработки экспериментальной информации, получаемой в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА. В экспериментах с использованием детекторов с позиционной чувствительностью было необходимо регистрировать, контролировать и вести запись на диск 20 параметров для каждого события. При этом, было необходимо контролировать не только одиночные параметры (одномерные спектры), но также проводить контроль за корреляциями некоторых параметров (двумерные, а иногда и многомерные спектры или их проекции).

В 1988-1989 годах на основе разработанных нами алгоритмов были написаны программы STRIPEXP.EXE и STRIPDAT.EXE для ON-LINE накопления данных и их последующей OFF-LINE обработки, соответственно. Позднее программы дорабатывались как по мере возникновения новых требований к эксперименту, так и по мере развития компьютерной базы нашей группы и перехода на более мощные компьютеры типа IBM PC-486 и рабочие станции SUN SPARC-station.

Всё программное обеспечение написано на языке TURBO PASCAL (версия 6) и работает под управлением операционной системы DOS 3 и выше. Размер исполняемых модулей этих программ составляет около 250 KB, а соответствующие текстовые файлы содержат около 8000 строк программного кода (~250 страниц

текста). Отметим, что в течении 1988-1996 годов предварительный и окончательный ON-LINE/OFF-LINE анализ всех данных, полученных на сепараторе, был сделан с использованием программ STRIPEXP.EXE и STRIPDAT.EXE (и их модификаций).

Современный вариант программы STRIPEXP.EXE для ON-LINE набора и обработки данных позволяет производить чтение данных из КАМАК-аппаратуры в одном из трёх режимов, добавление которых в программу осуществлялось по мере разработки новых типов контроллеров и интерфейсов. Набор данных может производиться в режиме опроса ("поллинга") регистра готовности очередного события; в режиме прерываний и в режиме прямого доступа к памяти.

Главным отличием программы STRIPDAT.EXE является то, что в ней полностью отсутствует часть, связанная с набором данных из КАМАК-аппаратуры. Вместо этого в STRIPDAT.EXE включены дополнительные процедуры, необходимые для проведения корреляционного анализа и графического представления получаемых результатов. Обе программы имеют одинаковый графический интерфейс и почти идентичные наборы пользовательских команд по обработке и калибровке спектров и работе с файлами, что существенно облегчает процесс изучения программы новым пользователем.

В *Главе 4* приведено описание экспериментов по синтезу новых нуклидов $^{218,219,223,224,225,226}\text{U}$, $^{225,226,227}\text{Np}$ и $^{228,229,230}\text{Pu}$.

В качестве примера на Рис.2а,б приведены часть корреляционного $E_{\alpha 1}$ - $E_{\alpha 2}$ спектра для временного окна 0-10 мс и распределение временных интервалов между зарегистрированными коррелированными событиями в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{226}\text{U} + 4n$. Корреляционные пары с энергиями материнских альфа-распадов $E_{\alpha 1} = 7320$ и $E_{\alpha 1} = 7170$ кэВ по энергиям дочерних переходов $E_{\alpha 2}$ и их временным распределениям легко идентифицируются как корреляции, связанные с распадом известных изотопов $^{223,224}\text{Th}$, соответственно. Для корреляций материнских альфа-распадов с энергией $E_{\alpha 1} = (7570 \pm 20)$ кэВ измеренные энергия перехода и период полураспада дочернего ядра ($E_{\alpha 2} = (7980 \pm 20)$ кэВ, $T_{1/2} = 2.6 \pm 0.4$ мс) хорошо совпадают с известными табличными характеристиками альфа-распада изотопа ^{222}Th и поэтому такие

корреляции можно идентифицировать как связанные с цепочками распадов

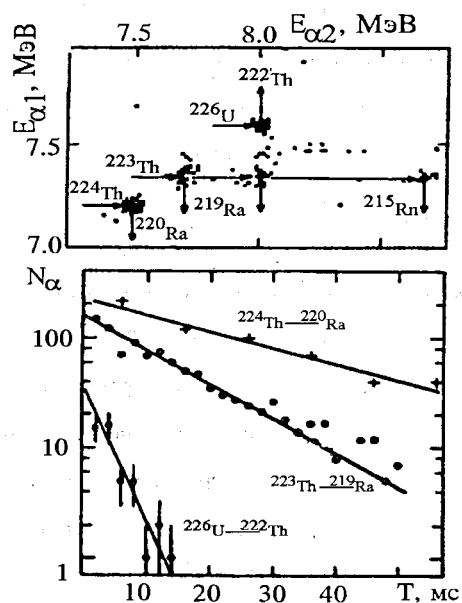
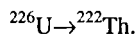


Рис.2 а) Корреляционный спектр для временного окна 0-10 мс; б) распределение временных интервалов для некоторых обнаруженных коррелированных пар альфа-распадов.

На Рис.3 представлен типичный α - α корреляционный спектр для продуктов реакции $^{26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{230}\text{Pu} + 4\text{n}$, полученный во временном окне 100-400 мс при энергии пучка $E_{\text{лаб.}}(^{26}\text{Mg}) = (135 \pm 1.5)$ МэВ. Из приведенного спектра хорошо видны корреляции материнских альфа-распадов с энергией $E_{\alpha 1} = (7050 \pm 15)$ кэВ (^{230}Pu) с дочерними альфа-распадами с энергиями $E_{\alpha 2} = (7560 \pm 15)$ кэВ (^{226}U), $E_{\alpha 3} = (7980 \pm 15)$ кэВ (^{222}Th), $E_{\alpha 4 + \alpha 5} = (17400 \pm 40)$ кэВ ($^{218}\text{Ra} + ^{214}\text{Rn}$). Всего было зарегистрировано около 30 таких корреляций, что соответствует сечению образования ^{230}Pu около 100 нанобарн.

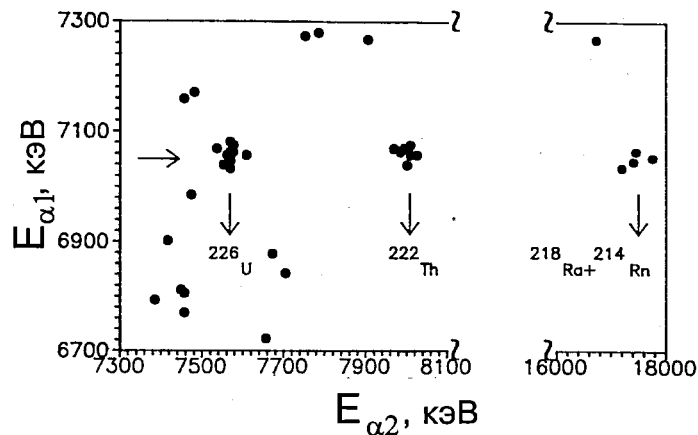


Рис.3 α - α корреляционный спектр для продуктов реакции $^{26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb}$, полученный во временном окне 100-400 мс.

Характеристики новых изотопов и реакции, в которых эти изотопы были получены, представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Характеристики новых изотопов, полученных в наших экспериментах.

Настоящая работа				данные других авторов		
Нуклид, реакция	E_{α} кэВ	I_{α} %	$T_{1/2}$, мс	E_{α} кэВ	I_{α} %	$T_{1/2}$, мс
^{226}U , $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	7570 ± 20	85 ± 5	200 ± 50	7562 ± 10	88	260 ± 10
	7420 ± 20	15 ± 5		7395 ± 10	12	
^{225}U , $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	7870 ± 20	85 ± 5	60 ± 10	7880 ± 20	90	80^{+40}_{-20}
	7820 ± 20	15 ± 5		7830 ± 20	10	
				7879 ± 15	85	95 ± 15
				7821 ± 15	15	
^{224}U , $^{20}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	8470 ± 15	100	$0.7^{+0.5}_{-0.2}$	8458 ± 20	100	1.0 ± 0.4
^{223}U , $^{20}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	8780 ± 40	100	0.05 ± 0.01			
^{219}U , $^{27}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$	9680 ± 40	100	$(42^{+34}_{-13}) \times 10^{-3}$			
^{218}U , $^{27}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$	8625 ± 25	100	$1.5^{+7.3}_{-0.7}$			
^{227}Np , $^{22}\text{Ne} + ^{209}\text{Bi}$	7680 ± 20	100		7650 ± 20		510 ± 60
				7677 ± 20		
^{226}Np , $^{22}\text{Ne} + ^{209}\text{Bi}$	8060 ± 20	50 ± 15		8044 ± 20	100	31 ± 8
	8000 ± 20	50 ± 15				
^{225}Np , $^{20}\text{Ne} + ^{209}\text{Bi}$	8630 ± 20	100				
^{230}Pu , $^{26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb}$	7050 ± 20	100				
^{229}Pu , $^{26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb}$	7460 ± 30	100				
^{228}Pu , $^{24}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb}$	7810 ± 20	100				

Подчеркнём, что данные для части новых изотопов, полученных в наших работах, были подтверждены в более поздних экспериментах других авторов, где были получены величины, хорошо согласующиеся с нашими данными.

Наряду с синтезом и идентификацией новых изотопов в наших экспериментах были также проведены измерения характеристик альфа-распада для большого числа уже известных нуклидов. Здесь необходимо подчеркнуть, что для большинства нуклидов, получающихся в исследованных нами реакциях, сведения о характеристиках их альфа-распадов были получены в одной-двух работах, в которых сообщалось об их первом наблюдении и идентификации. Поэтому неудивительно, что в ряде случаев полученные нами данные либо позволяют уточнить характеристики и схему альфа-распада, либо отличаются на величины, большие, чем наблюдаемые ошибки измерений. Все такие случаи приведены в наших публикациях и систематизированы в Таблице 3.

Таблица 3. Данные, полученные для некоторых изотопов в области актиноидов.

Настоящая работа				данные других авторов		
Нуклид	E_{α} , кэВ	I_{α} , %	$T_{1/2}$, мс	E_{α} , кэВ	I_{α} , %	$T_{1/2}$, мс
^{217}Fr	*	100	$(16 \pm 2) \times 10^{-3}$	8315 ± 8	100	$(22 \pm 5) \times 10^{-3}$
^{219}Ra	7670 ± 20	55 ± 5	10 ± 1	7675 ± 10	65 ± 3	10 ± 3
	7980 ± 20	45 ± 5		7980 ± 10	35 ± 2	
^{220}Ra	7460 ± 25	100	17 ± 2	7457 ± 10	100	23 ± 5
^{221}Ac	7170 ± 15	2.4 ± 1		7170 ± 10	2	52 ± 2
	7380 ± 15	11 ± 2		7375 ± 10	10 ± 5	
	7440 ± 15	23 ± 4		7440 ± 10	20 ± 5	
	7650 ± 15	63 ± 7		7645 ± 10	70 ± 5	
^{221}Th	7730 ± 15	5 ± 1	1.9 ± 0.1	7733 ± 8	6	1.68
	8150 ± 15	51 ± 5		8145 ± 5	56	
	8375 ± 15	11 ± 2		8472 ± 5	39	
	8470 ± 15	33 ± 4				
^{222}Th	7980 ± 15	97 ± 1	2.2 ± 0.2	7982 ± 5	100	
	7600 ± 15	3 ± 1				
^{223}Th	7290 ± 15	41 ± 5		7285 ± 10	60 ± 10	660 ± 10
	7320 ± 15	29 ± 5		7315 ± 10	40 ± 10	
	7350 ± 15	20 ± 5				
	7390 ± 15	10 ± 4				
^{223}Pa	8000 ± 15	55 ± 4	7.5 ± 1.5	8006 ± 10	55 ± 5	6.5
	8190 ± 15	45 ± 4		8196 ± 10	45 ± 5	
^{224}Pa	7460 ± 15	25 ± 3		7490 ± 10	100	950 ± 150
	7550 ± 15	75 ± 3				

Глава 5 посвящена обсуждению полученных результатов.

На Рис.4 символами представлены данные об измеренных энергиях альфа-распада новых изотопов урана, нептуния и плутония, полученных в данной работе. Сплошной линией показаны результаты расчётов по модели Лирана-Зельдеса [6]. Типичные ошибки в измерении энергии составляют 20-30 кэВ и на Рис.4 не показаны

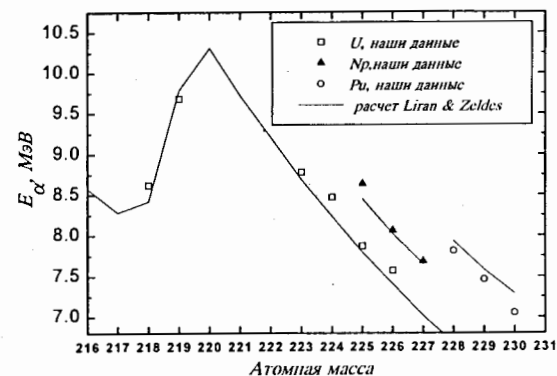


Рис.4 Сравнение измеренных данных (символы) об энергии альфа-распада для новых изотопов U-Pu с расчётными данными из работы [6] (сплошные линии).

На Рис.5 представлены данные о периодах полураспада новых изотопов урана, измеренных в данной работе. Также приведены результаты двух расчётов, выполненных по формулам из работ [11] и [12]. Рисунок хорошо демонстрирует тот факт, что модель [11], рассматривающая альфа-распад как суперасимметричное деление, очень хорошо $((T_{1/2})_{\text{эксп.}} / (T_{1/2})_{\text{расч.}} \leq 2)$ описывает экспериментальные данные для всех новых изотопов урана, в то время как модель [12] недооценивает измеренные величины для ядер, близких к замкнутой оболочке $N=126$ ($^{218,219}\text{U}$), на фактор 5-10. В работе [11] также показано, что эта модель хорошо описывает экспериментальные данные о периодах полураспада практически всех известных чётно-чётных ядер с $84 \leq Z \leq 102$.

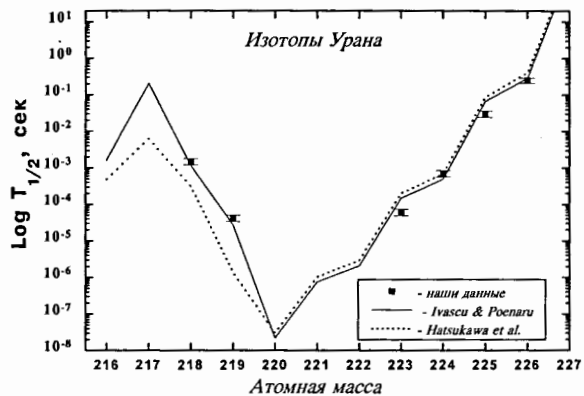


Рис.5 Сравнение измеренных периодов полураспада для новых изотопов $^{218,219,223-226}\text{U}$ с данными расчётов [11] и [12].

Отметим, что наш выбор именно этих двух моделей для расчёта периодов полураспада объясняется тем, что эти, сравнительно недавно созданные модели, были специально разработаны и оптимизированы для широких диапазонов ядер как по атомному номеру Z , так и по числу нейтронов N .

В Таблице 4 приведены экспериментальные значения дефектов массы. В большинстве случаев точность определяется точностью измерения дефекта массы дочернего ядра, а не точностью измерения энергии альфа-распада.

Таблица 4. Экспериментальные значения дефектов массы новых нуклидов, идентифицированных в данной работе.

Нуклид	Экспериментальный дефект массы, кэВ
^{218}U	21870 ± 100
^{219}U	23200 ± 80
^{223}U	25820 ± 70
^{224}U	25700 ± 26
^{225}U	27360 ± 22
^{226}U	27320 ± 24
^{225}Np	31580 ± 54
^{226}Np	32680 ± 100
^{227}Np	32560 ± 70
^{228}Pu	36070 ± 33
^{229}Pu	37380 ± 37
^{230}Pu	36920 ± 31

Мы провели сравнение вычисленных нами дефектов массы ядер для новых изотопов с расчётными значениями для трёх выбранных нами моделей: модели Мёллера и со-авторов [5], модели Лирана-Зельдеса [6] и модели Джэнеке-Мэссона [7]. На Рис.6 представлены значения экспериментальных и рассчитанных дефектов массы для новых изотопов, полученных в данной работе, причём мы приводим как значения самих дефектов массы (верхняя часть каждой картинки), так и величины разности экспериментального и рассчитанного значений дефектов массы $\Delta(M_{\text{эксп.}} - M_{\text{теор.}})$ (нижняя часть каждой картинки).

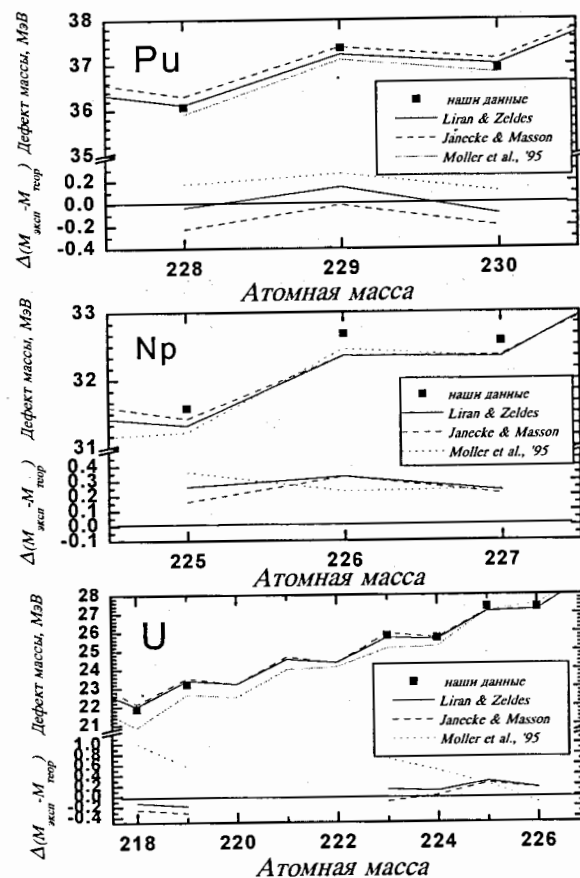


Рис.6 Сравнение экспериментальных (■) и расчётных дефектов массы для нуклидов, полученных в настоящей работе.

Приведённые данные свидетельствуют о том, модели Лирана-Зельдеса [6] и Джэнеке-Мэссона [7] дают достаточно хорошее описание значений масс в изучаемом диапазоне ядер: типичная разность $\Delta(M_{\text{эксп.}} - M_{\text{теор.}})$ для изотопов урана и плутония (Z -чётное) не превышает 100-200 кэВ, и только для изотопов нептуния (Z -нечётное) ошибка может достигать 250-300 кэВ. Модель Мёллера и со-авторов [5] даёт такое же хорошее согласие как и модели Лирана-Зельдеса и Джэнеке-Мэссона для изотопов нептуния и плутония и для изотопов урана с массами 225 и 226. Для более лёгких изотопов урана эта модель недооценивает массы на величину около 0.6-1 МэВ.

Обсуждение вероятности альфа-распада ядер было проведено с использованием величин приведённых ширин альфа-распадов δ^2 , рассчитываемых по методу, предложенному в работе [13]:

$$\delta^2 = \lambda_\alpha \times h/D,$$

где λ_α - измеренное значение постоянной распада, а D - коэффициент проницаемости альфа-частицы через барьер. Удобством такого анализа является то, что из рассмотрения убирается зависимость вероятности альфа-распада от таких макро-величин как энергия альфа-распада, масса и заряд ядра и величина δ^2 фактически характеризует вероятность образования альфа-частицы в ядре. На Рис.7 приведена δ^2 -систематика для чётно-чётных ядер с $84 \leq Z \leq 92$. Рис.7 демонстрирует тот факт, что для чётно-чётных изотопов урана с $N > 126$ измеренные приведённые альфа-ширины сравнимы с δ^2 -величинами для известных тяжёлых чётно-чётных изотопов элементов с $84 \leq Z \leq 92$. Видно, что приведённая альфа-ширина для изотопа ^{218}U сравнима с приведёнными альфа-ширинами изотопов других элементов с $N=126$, подтверждая тем самым наличие замкнутой оболочки для этого ядра.

Анализ вероятности альфа-распада для нечётно-чётных изотопов урана с $A \leq 233$ был проведён с использованием концепции факторов запрета [14], показывающих во сколько раз изучаемый альфа-переход в нечётно-чётном ядре замедлен по сравнению с аналогичными переходами в соседних чётно-чётных ядрах. Мы можем констатировать тот факт, что альфа-распад всех рассмотренных нечётно-

чётных изотопов урана с $A \leq 233$ является разрешённым и наличие дополнительного неспаренного нейтрона не оказывает существенного влияния на альфа-распад этих изотопов. Это, вероятно, является следствием того, что волновые функции материнских (ядра урана) и дочерних ядер (ядра тория) имеют сходные структуры.

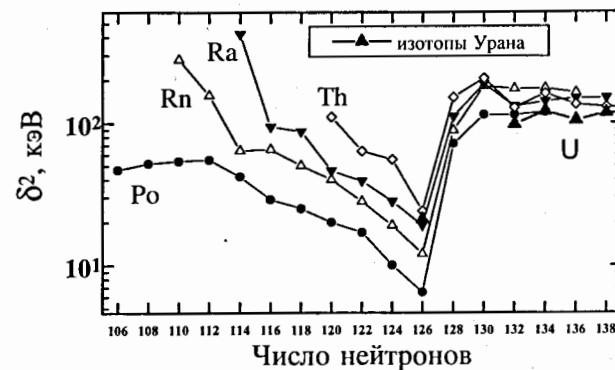


Рис.7 Систематика приведённых ширин для чётно-чётных нуклидов с $Z=84-92$.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации:

1. На кинематическом сепараторе ВАСИЛИСА проведены эксперименты по изучению характеристик альфа-распада нейтронодефицитных ядер в малоизученной области с $90 \leq Z \leq 94$ и $218 \leq A \leq 230$.
2. Разработаны алгоритмы и на их основе написаны программы для ON-LINE набора и OFF-LINE обработки экспериментальных данных, получаемых в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА. Эти программы и их модификации были использованы для получения и обработки всех экспериментальных данных на сепараторе ВАСИЛИСА в течении 1988-1996 годов.
3. В реакциях полного слияния $^{20,22}\text{Ne}, ^{24,26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb}$, $^{20,22}\text{Ne} + ^{209}\text{Bi}$ и $^{27}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$ синтезировано 12 новых нуклидов $^{218,219,223-226}\text{U}$, $^{225-227}\text{Np}$, $^{228-230}\text{Pu}$. Для ряда уже

известных нуклидов получены уточнённые данные о характеристиках их альфа-распада.

4. На основе полученных экспериментальных данных вычислены значения дефектов массы новых нуклидов. Полученные данные сравниваются с результатами нескольких наиболее распространённых расчётов масс ядер. Показано, что расчёты Лирана-Зельдеса, Мёллера и со-авторов и Джэнеке-Мэссона дают достаточно хорошее согласие для изучаемых ядер с $N > 126$. Показано, что новая модель Мёллера и со-авторов с учётом октапольной деформации даёт лучшее согласие с экспериментальными данными, чем это было в их предыдущей модели, которая не учитывала этот эффект.
5. Проанализированы данные о периодах полураспада и приведённых ширинах альфа-распада для изотопов урана. Показано, что полученные приведённые ширины хорошо вписываются в систематики приведённых ширин альфа-распада для чётно-чётных ядер в области $84 \leq Z \leq 94$.
6. На основе данных о факторах запрета проанализированы данные о вероятностях альфа-распада изотопов урана с нечётным массовым числом в широкой области изменения массового числа $219 \leq A \leq 233$. Показано, что альфа-распад всех рассмотренных нуклидов является разрешённым и наличие дополнительного неспаренного нейтрона не оказывает существенного влияния на вероятность альфа-распада этих изотопов, что, вероятно, является следствием того, что волновые функции материнских (ядра урана) и дочерних ядер (ядра тория) имеют сходные структуры.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Андреев А.Н., Горшков В.А., Богданов Д.Д., Ерёмин А.В., Кабаченко А.Р., Кузнецов А.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., "Многодетекторная система набора информации в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА." // Дубна, 1991, 14с./ Сообщения Объед. ин-т ядерн. исслед.: P13-91-34
2. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Ерёмин А.В., Кабаченко А.П., Орлова О.А., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И.. "Измерение сечений реакций с испарением лёгких

частиц в канале полного слияния при облучении Au и Pb ионами Ne." // Ядерная Физика, 1989, т.50, вып.9, стр.619-625

3. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Ter-Akopian G.M., Yeremin A.V., "The new isotopes $^{223,224}\text{U}$." // Z.Phys.A, 1991, vol. 338, p.363-364
4. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Sagaidak R.N., Ter-Akopian G.M., Yeremin A.V., "The new isotope ^{218}U ." // Z.Phys. A, 1992, vol. 342, p.123-124
5. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Sagaidak R.N., Ter-Akopian G.M., Veselsky M., Yeremin A.V., "The new isotope ^{219}U ." // Z.Phys. A, 1993, vol. 345, p.247-248
6. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Ерёмин А.В., Кабаченко А.П., Мальшев О.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., Шаро Ш., "Новые нуклиды $^{226,227}\text{Np}$." // В сб.: Труды Межд. Школы-семинара по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-90-142, 1990, с.508
7. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Ерёмин А.В., Кабаченко А.П., Мальшев О.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., Шаро Ш., "Новые нуклиды $^{226,227}\text{Np}$." // Краткие Сообщения ОИЯИ N6,[45]-90, с.66-69
8. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Sharo S., Ter-Akopian G.M., Yeremin A.V., "The new nuclide ^{230}Pu ." // Z.Phys.A, 1990, vol.337, p.231-232
9. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., O.N.Malyshev, A.G.Popeko, R.N.Sagaidak, Ter-Akopian G.M., Veselsky M., Yeremin A.V., "New nuclides $^{228,229}\text{Pu}$." // Z.Phys. A, 1994, vol.347, p.225-226
10. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Florek M., Kabachenko A.P., O.N.Malyshev, Saro S., Ter-Akopian G.M., Veselsky M., Yeremin A.V., "Alpha decay of new U, Np and Pu isotopes and alpha spectroscopy for nuclei between Fr and Pa." // Instr. Phys. Conf. Ser. No 132: Section 5, In: Proc. of 6th International Conference on Nuclei far from Stability + 9th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernkastel-Keus, July 19-24, 1992 (IOP Publishing Ltd, London) p.759-761
11. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., O.N.Malyshev, Sagaidak R.N., Ter-Akopian G.M., Veselsky M., Yeremin A.V., "The new isotope ^{224}U and alpha-decay studies in the region of Ac-Pu." // In: Proc. of Int. School- Seminar on Heavy Ion Physics, Dubna, 10-15 May, 1993, JINR E7-93-274, vol.1, p.493-496

Цитируемая литература.

- [1] Rasmussen J.O., //Alpha-, Beta-, and Gamma-ray spectroscopy (North Holland, Amsterdam, 1974), Sec.XI
- [2] Roeckl E. and Schardt D., "Recent results on alpha radioactivity." // In: Particle Emission from Nuclei, 1989, vol.2, Chapter 1, Poenaru D.N. and Ivascu M.S. Eds., CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida
- [3] Nazarewicz W., Olanders P., Ragnarsson I., Dudek J., Leander G.A., Moeller P., Ruchowska E., "Analysis of octupole instability in medium-mass and heavy nuclei." //Nucl. Phys. A, 1984, vol. 429, p.269-295

- [4] Butler P., Nazrewicz W., "Intrinsic reflection asymmetry in atomic nuclei." // Review of Modern Physics, 1996, vol.68, p.349-421
- [5] Moeller P., Nix J.R., Myers W.D., Swiatecki W.J., "Nuclear ground-state masses and deformations." //At.Data Nucl. Tables, 1995, vol.59, p.185-381
- [6] Liran S. and Zeldes N., "A semiempirical shell-model formula." //At. Data Nucl. Tables, vol. 17,1976, p.431-441
- [7] Janecke J and Masson P.J., "Mass predictions from the Garvey-Kelson mass relations." //At. Data Nucl. Data Tables, vol.39, 1988, p.265-271
- [8] Yeremin A.V., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Gorschkov V.A., Ivanenko A.I., Kabachenko A.P., Rubinskaya L.A., Smirnova E.M., Stepanov S.V., Voronkov E.N., Ter-Akopian G.M., "The VASSILISSA facility for electrostatic separation and study of complete fusion reaction products." // Nucl. Instr. and Meth. A, 1989, vol. 274, p.528-532
- [9] Andreyev A.N., Bashevoy V.V., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Rohac J., Saro S., Taranenko A.V., Ter-Akopian G.M., Yeremin A.V., "Large area high-efficiency time-of-flight system for detection of low energy heavy evaporation residues at the electrostatic separator VASSILISSA." // Nucl.Instr. and Meth. A, (1995),vol. 364, p.342-348
- [10] Hofmann S., Faust W., Muenzenberg G., Reisdorf W., Armbruster P., Guettner K., Ewald H., "Alpha decay of very neutron deficient isotopes of Hf, Ta, W and Re." //Z.Phys. A, 1979,vol. 291,p.53-70
- [11] Ivascu M.S. and Poenaru D.N., "Fission approach to the alpha decay."// In: Particle Emission From Nuclei, vol. 2, Chapter 4, D.N.Poenaru and M.S.Ivascu Eds., CRC Press, Boca Raton, Flo.,1989, p.93-125
- [12] Hatsukawa Y., , Nakahara H., Hoffman D.,"Systematics of alpha decay half-lives." // Phys.Rev. C, 1990, vol. 42, p.647-682
- [13] Rasmussen J.O., "Alpha-decay barrier penetrabilities with an exponential nuclear potential: even-even nuclei."//Phys.Rev.,1959, vol.113, p.1593-1598
- [14] Перлман И.П. и Расмуссен Дж.,//Альфа-радиоактивность, Пер. с англ., М.: Изд- во иностр. лит.,1959

Рукопись поступила в издательский отдел
11 декабря 1997 года.